

УДК. 621.314.

Плахтій Олександр Андрійович, асп.Українська державна академія залізничного транспорту, м. Харків, Україна; майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050; тел.: +38 093 9176020, E-mail: 83et@mail.ru, (orcid.org/0000-0002-1535-8991)**ТРИФАЗНИЙ ТРИРІВНЕВИЙ АКТИВНИЙ ВИПРЯМЛЯЧ З ГІСТЕРЕЗИСНОЮ СИСТЕМОЮ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ**

У статті представлено аналіз трирівневого активного випрямляча з корекцією коефіцієнта потужності. Трирівневий активний випрямляч компенсує вищі гармонійні складові, що генеруються нелінійними навантаженнями, і реалізує коефіцієнт потужності близький до одиниці.

Ключові слова: активний трифазний випрямляч, корекція коефіцієнта потужності, електромагнітна сумісність.

Плахтий Александр Андреевич, асп.Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г. Харьков, Украина; площадь Фейербаха, 7, г. Харьков, Украина, 61050; тел.: +38 093 9176020, E-mail: 83et@mail.ru, (orcid.org/0000-0002-1535-8991)**ТРЕХФАЗНЫЙ ТРЕХУРОВНЕВЫЙ АКТИВНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ С ГИСТЕРЕЗИСНОЙ СИСТЕМОЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

В статье представлен анализ трёхуровневой активного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности. Трёхуровневый активный выпрямитель компенсирует высшие гармонические составляющие, генерируемые нелинейными нагрузками, и реализуют коэффициент мощности близкий к единице.

Ключевые слова: активный трёхфазный выпрямитель, коррекция коэффициента мощности, электромагнитная совместимость.

Plakhtiy Alexandr Andrievich, Ph.D. studentUkrainian state academy of railway transport, Kharkov, Ukraine, square Feuerbach, 7, Kharkov, Ukraine, 61050; tel.: +38 093 9176020, E-mail: 83et@mail.ru, (orcid.org/0000-0002-1535-8991)**MULTILEVEL ACTIVE THREE PHASE RECTIFIER**

Three phase diode bridge rectifiers have a low power factor [1]. They are a powerful source of higher current harmonics in industrial network. Pressing issue is improvement of electromagnetic compatibility of three-phase rectifier units. One of the ways of power factor correction is the application of two-level active rectifiers [2]. Two-level active rectifiers' implements sinusoidal input phase currents and unity power factor. Another advantage of this rectifier is the implementation of the energy recovery from DC line to the three-phase network. Significant disadvantage of two-level active rectifier is high load requirements keys schemes. This leads to restrictions on the use of this scheme with the networks of medium and high voltage. One way to reduce the load requirements of the keys is to implement a three-level active rectifiers [3, 4]. The aim of this thesis is presentation of analysis of the automatic control system of three-level active three-phase rectifier, analysis of implemented power factor, analysis of quality of the input and output currents and voltages. Serial connection of IGBT-keys and output capacitors in a three-level active rectifier allows implementing minimal applied voltage to the circuit elements. This allows the use of a three-level active rectifier in medium voltage networks 1-35 kV. Besides multilevel structure allows to implement lower harmonic distortion of phase current in comparison with two-level rectifier.

Key words: active three-phase rectifier, power factor correction, electromagnetic compatibility.

Постановка проблеми

Силовые диодные и тиристорные трехфазные выпрямители обладают низким коэффициентом мощности и являются мощным источником высших гармонических составляющих тока в общепромышленную сеть. Вторым их недостатком является отсутствие возможности реализации возврата энергии из звена постоянного тока в трехфазную сеть. Актуальным является вопрос улучшения электромагнитной совместимости трехфазными выпрямительными установками.

Анализ последних исследований

Анализ электромагнитной совместимости диодных и тиристорных выпрямителей достаточно полно освещен в [1]. Одним из вариантов реализации коррекции коэффициента мощности является применение двухуровневых активных выпрямителей [2]. Двухуровневые активные выпрямители реализуют синусоидальную форму входных фазных токов, с

коэффициентом мощности близким к единице. Еще одним достоинством данного выпрямителя является возможность реализации рекуперации из звена постоянного тока в трехфазную сеть. Схема двухуровневого активного выпрямителя представлена на рис. 1.

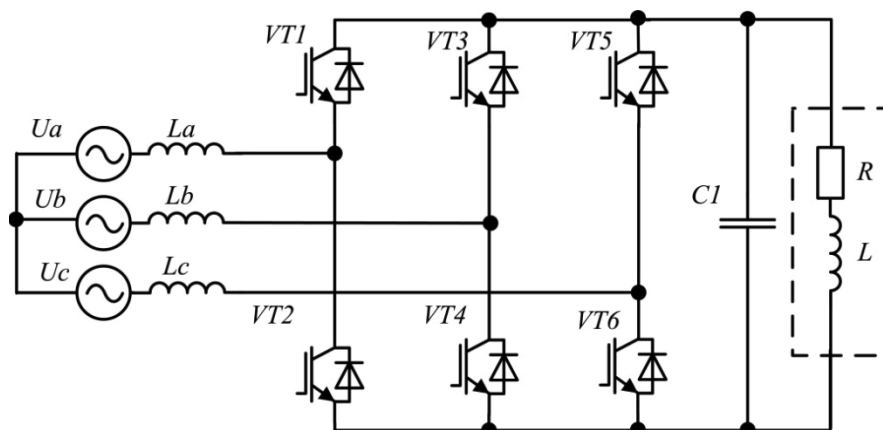


Рис. 1. Схема двухуровневого активного выпрямителя

Существенным недостатком двухуровневого активного выпрямителя является высокие нагрузочные требования к ключам схемы, что обуславливает ограничение применения данной схемы с сетями среднего и высокого напряжения. Одним из путей снижения нагрузочных требований к ключам является реализация трехуровневых активных выпрямителей [3, 4]. Однако в данных работах не приведено описание системы автоматического управления.

Целью данной работы является исследование предложенной системы автоматического управления трехуровневого активного трехфазного выпрямителя, а также реализуемой ею качества входных и выходных параметров тока и напряжения, анализ режима рекуперации.

Основная часть

Схема трехуровневого активного выпрямителя представлена на рис. 2. Последовательное соединение ключей и выходных конденсаторов трехуровневого активного выпрямителя позволяет реализовать меньшее приложенное напряжение к элементам схемы и позволяет применять многоуровневый активный выпрямитель в сетях среднего напряжения 1-35 кВ. Кроме этого многоуровневая структура позволяет реализовать меньшие гармонические искажения формы фазного тока по сравнению с двухуровневым выпрямителем.

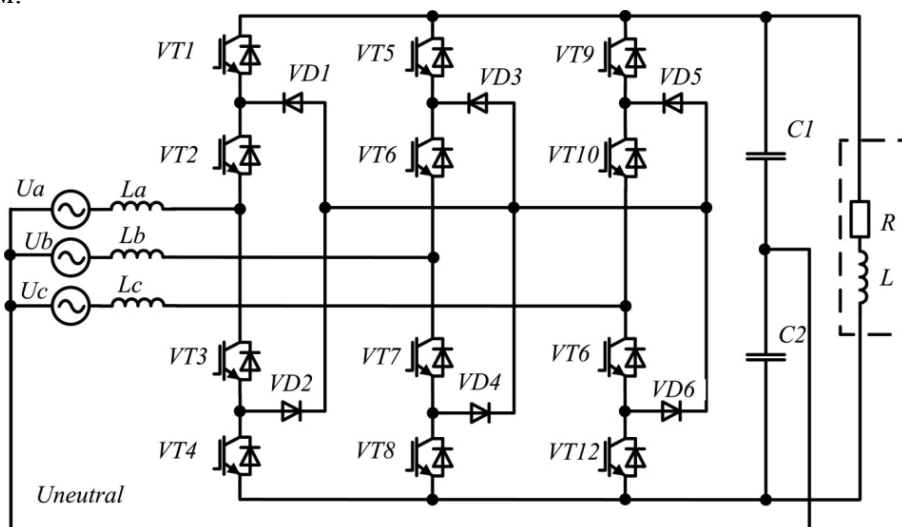


Рис. 2. Схема трехуровневого активного трехфазного выпрямителя

Автором предложена гистерезисная система автоматического управления трехуровневого активного выпрямителя, которая представлена на рисунке 3. Достоинством предлагаемой системы управления является ее простота, возможность реализации регулирования выпрямленного напряжения, реализация коррекции коэффициента мощности, а также возможность реализации рекуперации. Еще одним достоинством системы управления является отсутствие необходимости преобразования систем координат abc-dqo и разделения управлением активной и реактивной мощностью, что значительно усложняет систему управления и требует дополнительных вычислительных мощностей.

Входные фазные токи активного выпрямителя I_{abc} повторяют форму опорного сигнала, полученного из сигналов фазных токов U_{abc} , но с амплитудой необходимой для поддержания заданного уровня выходного напряжения.

Режим рекуперации реализуется с помощью регулятора рекуперации (см. Recup.Reg. на рис. 3). При превышении выходного напряжения выше заданного уровня либо по сигнала задания регулятор рекуперации выполняет инверсию формы фазных токов. При этом токи будут сдвинуты относительно напряжения на 180 град., а энергия будет передаваться из звена постоянного тока в трехфазную сеть (см. рис. 7).

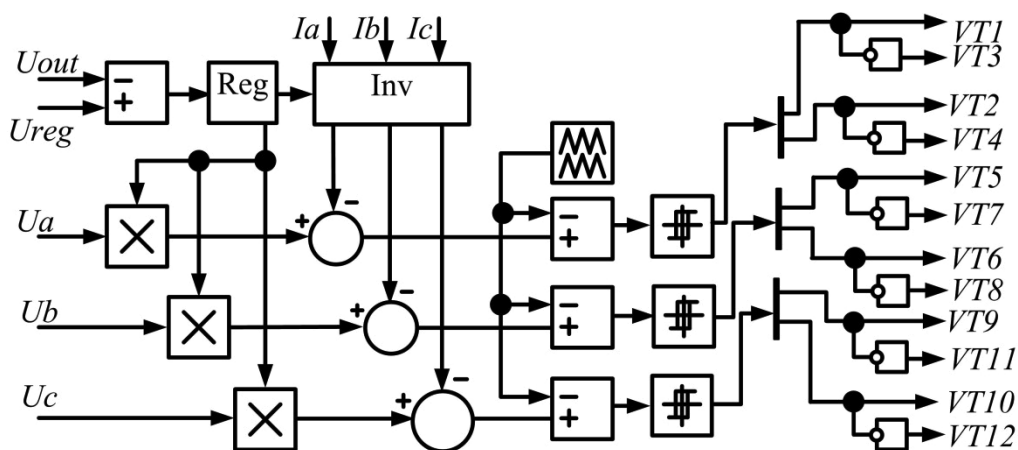


Рис. 3. Гистерезисная система автоматического управления трехуровневого активного выпрямителя

где: U_{out} – выходное напряжение активного выпрямителя; U_{ref} – уровень задания выходного напряжения активного выпрямителя;

U_{abc} – мгновенные значения фазных напряжений; I_{abc} – мгновенные значения фазных токов АВ;

Математическая модель преобразователя выведена из коммутационной функции ключей активного выпрямителя на основе двухуровневой широтно-импульсной модуляции. Математическая модель описывает связь входных токов выпрямителя и выходного напряжения. Полученная модель позволяет выполнить проектирование системы управления, обеспечивающая коэффициент мощности близкий к единице, а позволяет найти область устойчивости преобразователя при различных условиях эксплуатации.

Токи «положительных» и «отрицательных» плечей активного выпрямителя, протекающие в звено постоянного напряжения описываются уравнениями:

$$i_p = S_{ap} \cdot i_a + S_{bp} \cdot i_b + S_{cp} \cdot i_c, \quad (1)$$

$$i_n = S_{an} \cdot i_a + S_{bn} \cdot i_b + S_{cn} \cdot i_c, \quad (2)$$

где S_{ap}, S_{bp}, S_{cp} – коммутационные функции, описывающие состояние ключей «положительных» плечей выпрямителя VT1, VT2 для фазы А, VT5, VT6 для фазы В, VT9, VT10 для фазы С (см. индекс «р» в переменной).

S_{an}, S_{bn}, S_{cn} – коммутационные функции, описывающие состояние ключей «отрицательных» плечей выпрямителя VT3, VT4 для фазы А, VT7, VT8 для фазы В, VT11, VT12 для фазы С (см. индекс «n» в переменной).

Соотношение между входным напряжением выпрямителя и выходным напряжением на конденсатора описывается следующим уравнением:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{abp} & S_{abn} \\ S_{bcp} & S_{bcn} \\ S_{cap} & S_{can} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_p \\ V_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

Напряжение в звене постоянного тока описывается:

$$V_p - V_n = V_{dc} \quad (4)$$

$$V_p + V_n = 2 \cdot \Delta V_{dc} \quad (5)$$

Подставив уравнения (4) и (5) в (3) получим:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{abp} - S_{abn} \\ S_{bcp} - S_{bcn} \\ S_{cap} - S_{can} \end{bmatrix} \cdot \frac{V_{dc}}{2} + \begin{bmatrix} S_{abp} + S_{abn} \\ S_{bcp} + S_{bcn} \\ S_{cap} + S_{can} \end{bmatrix} \cdot \Delta V_{dc} \quad (6)$$

$$i_n = C_n \frac{dV_n}{dt} + \frac{V_n}{R_n} \quad (7)$$

$$i_p = C_p \frac{dV_p}{dt} + \frac{V_p}{R_p} \quad (8)$$

Уравнение связывающее входные напряжения и токи с выходным напряжением выпрямителя

$$\begin{bmatrix} V_{abs} \\ V_{bcs} \\ V_{cas} \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} \frac{d(t_a - t_b)}{dt} \\ \frac{d(t_b - t_c)}{dt} \\ \frac{d(t_c - t_a)}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Подставив уравнение (9) в (6) получим систему уравнений описывающую динамическую модель активного выпрямителя:

$$\frac{d(t_{sn})}{dt} = \frac{1}{3L} V_s - \frac{1}{3L} S \frac{V_{dc}}{2} - \frac{1}{3L} S_{np} \Delta V_{dc} \quad (10)$$

$$\frac{d(V_{dc})}{dt} = \frac{1}{C} V_s \cdot S^T \cdot i_{sn} - \frac{V_{dc}}{2C} \left(\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_c} \right) - \Delta V_{dc} \quad (11)$$

$$\frac{d(\Delta V_{dc})}{dt} = \frac{1}{2C} S_{np}^T \cdot i_{sn} + \frac{V_{dc}}{4C} \left(\frac{1}{R_n} - \frac{1}{R_p} \right) - \frac{\Delta V_{dc}}{2C} \left(\frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_p} \right) \quad (12)$$

Коммутационные функции S и S_{np} в аналитической форме могут быть получены из канала ШИМ-управления, содержащий опорный сигнал разности тока и масштабированного напряжения и два пилообразных несущих сигнала.

Для подтверждения адекватности и работоспособности разработанной системы в пакете Matlab была создана иммитационная модель трехуровневого активного выпрямителя с предложенной системой управления. Модель представлена на рис. 4 и рис. 5.

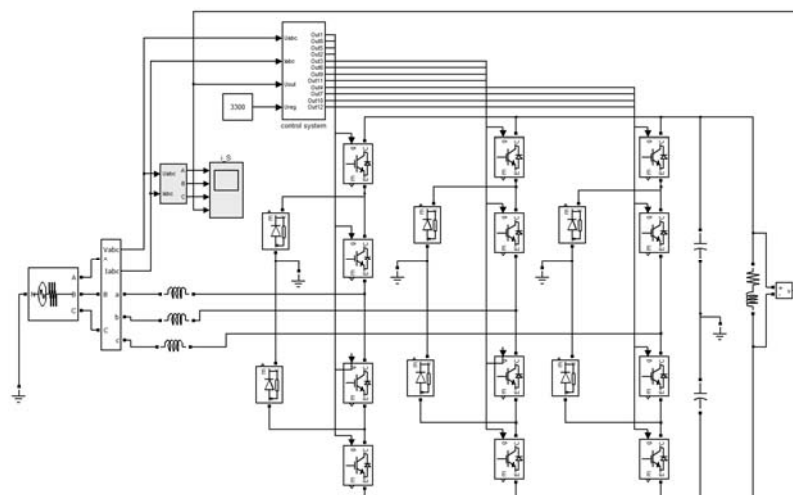


Рис. 4. Модель Matlab трёхуровневого активного выпрямителя

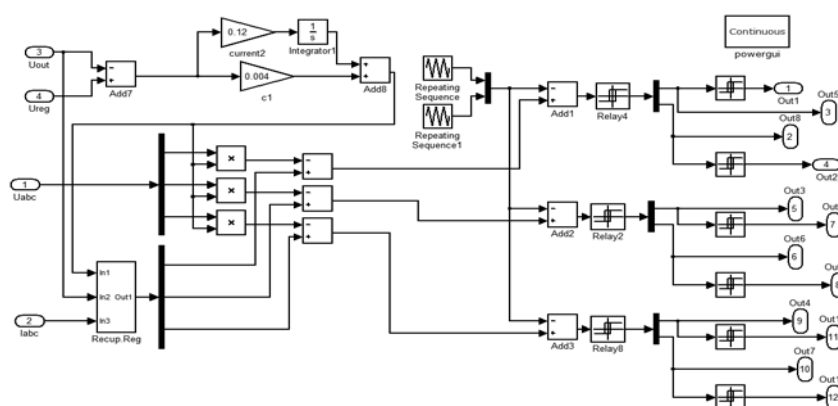


Рис. 5. Модель системы управления трёхуровневого активного выпрямителя

Параметры имитационной модели приведены ниже:

- межфазное напряжение трехфазной сети: 1200 В
- индуктивность входных фильтров: 0,2 мГн
- емкость выходных конденсаторов: 12 мФ
- параметры нагрузки: 13 Ом; 0,1 Гн
- задание выходного напряжения: 3300 В

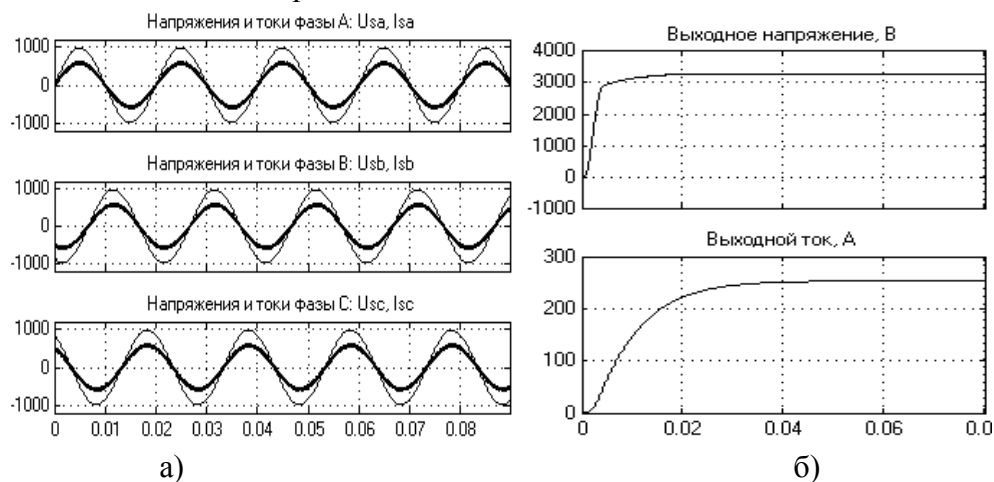


Рис. 6: а) – осциллограммы фазных напряжений и токов активного трёхуровневого выпрямителя; б) – осциллограмма выходного напряжения и тока активного выпрямителя

Как видно из рис. 6, предложенная система управления реализует форму фазных токов близкую к синусоиде и $\cos(\varphi)$ близкий к единице, а также высокую стабильность

выходного напряжения.

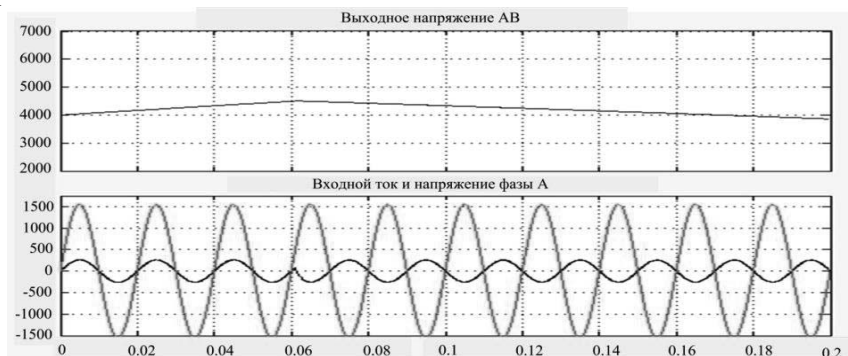


Рис. 7. Напряжения и токи фазы А активного трехуровневого выпрямителя при переходе из режима активного выпрямителя в режим рекуперации

Проведенный Фурье-анализ полученных результатов моделирования дал следующие энергетические показатели выпрямителя:

- коэффициент мощности трехуровневого активного выпрямителя 99,34 %;
- коэффициент нелинейных искажений входных фазных токов 0,6 %;
- коэффициент пульсаций выходного напряжения: 0,2471 %;
- коэффициент мощности в режиме рекуперации: -98,78

Выводы

В статье предложена гистерезисная система автоматического управления трехуровневого трехфазного активного выпрямителя. Достоинством системы является возможность реализации режимов активного выпрямления и рекуперации с высоким коэффициентом мощности, а также высокое качество выпрямленного напряжения. Результаты имитационного моделирования подтверждают возможность реализации коэффициента мощности близкого к единице, возможность реализации рекуперации, а также высокого качества выпрямленного напряжения. В дальнейшем необходимыми являются исследования устойчивости системы автоматического управления активного трехуровневого выпрямителя.

Список литературы

1. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники, уч. пособие, изд. 3-е. Новосибирск: изд. НГТУ, 2004, 672 с.
2. Овчинников Д. А., Кастров М. Ю., Трехфазный выпрямитель с коррекцией коэффициента мощности [Текст] / Практическая силовая электроника. 2002. вып. 6. – С. 12–39
3. Пронин М. В., Воронцов А. Г., Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) [Текст] / СПб: «Электросила», 2003. – 172 с.
4. Mao H., Boroyevich D., Lee F. C. Novel reduced-order small signal model of a three-phase PWM rectifier and its application in control design and system analysis [Текст] / IEEE Trans. Power Electron., vol. 13. 1998. – С. 511–531.
5. N. Celanovic and D. Boroyevich, “A Comprehensive Study of Neutral-Point Voltage Balancing Problems in Three-Level Neutral-Point-Clamped Voltage Source Inverters”, [Текст], IEEE Trans on Power Electronics, Vol. 15, № 2, March 2000, P. 242–249.

References

1. Zinovev G. S., (2004), “Fundamentals of Power Electronics”, [Osnivi silovoy elektroniki], NGTU, Novosibirsk, P. 672.
2. Ovchinnikov, D. A., Kastrov M. Yu. (2002), “Three-phase rectifier with power factor correction”, [Tryehfazniy vipryamitel' s korrektsiey koeffitsienta moshchnosti], Practical Power Electronic, , No. 6, P. 12–39.
3. Pronin M. V., Vorontsov A. G (2003), “Completely controllable semiconductor power converters (modeling and calculation)”, [Silovie polnost'yu upravlyaemie poluprovodnikovie preobrazovateli. Modelirovanie i raschet] Electropower, P. 173.
4. Mao H., Boroyevich D., Lee F. (1998), “Novel reduced-order smallsignal model of a three-phase PWM rectifier and its application in control design and system analysis”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 13. P.511–531.
5. N. Celanovic, D. Boroyevich, (2000), “A Comprehensive Study of Neutral-Point Voltage Balancing Problems in Three-Level Neutral-Point-Clamped Voltage Source Inverters”, IEEE Trans on Power Electronics, Vol. 15, № 2, P. 242–249.

Поступила в редакцию 20.07 2014 г.